



Sistemas de Producción

Asunción Gómez-Pérez
asun@fi.upm.es

Departamento de Inteligencia Artificial
Facultad de Informática
Universidad Politécnica de Madrid
Campus de Montegancedo sn,
28660 Boadilla del Monte, Madrid, Spain

Bibliografía de Sistemas de Producción

- **Ingeniería del Conocimiento** (ED Ceura)

A. Gómez, N. Juristo, C. Montes, J. Pazos

- **Inteligencia Artificial** (ED Ceura)

D. Borrajo, N. Juristo, V. Martínez, J. Pazos

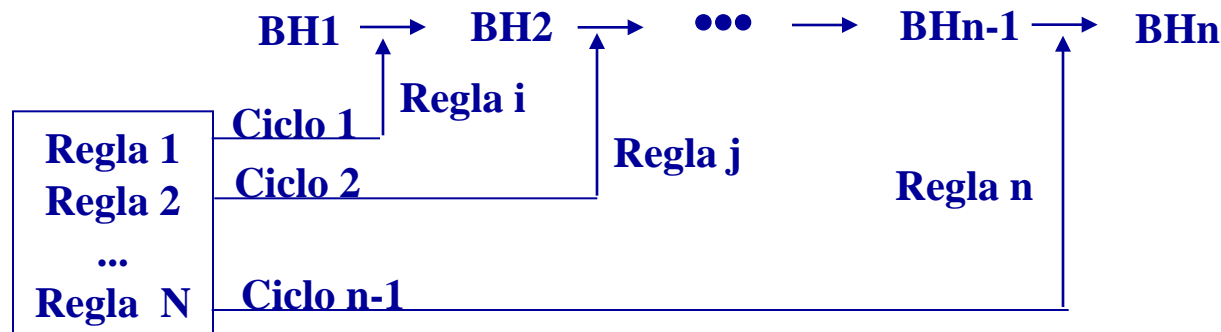
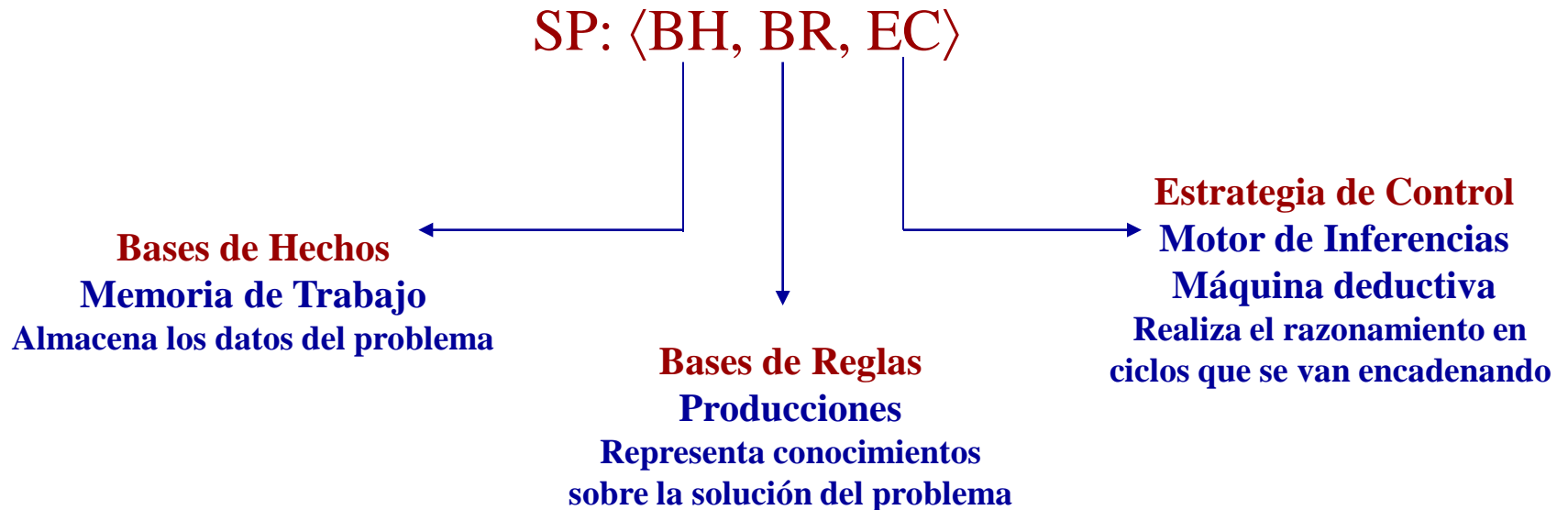
- **Artificial Intelligence**

Rich and Knight

Indice

1. **Arquitectura de los Sistemas de Producción**
2. **Base de Hechos**
3. **Base de Reglas**
4. **Estrategia de Control**
 - 4.1. **Ciclo de Funcionamiento**
 - 4.2. **Encadenamientos**

Arquitectura de los Sistemas de Producción



Ejemplo de Sistemas de Producción

Base de Reglas

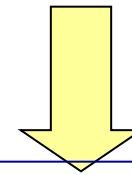
R1: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A sí)
Entonces (Vertebrado \$A)

R2: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A no)
Entonces (Invertebrado \$A)

R3: Si (Vertebrado \$A) (Ladra \$A)
Entonces (Perro \$A)

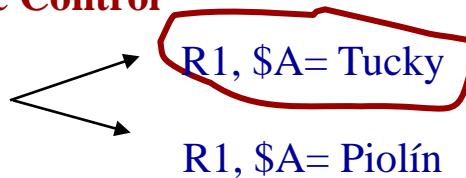
Base de Hechos

(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)



Estrategia de Control

Ciclo 1:



(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)
(Vertebrado Tucky)

Ejemplo de Sistemas de Producción

Base de Reglas

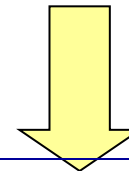
R1: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A sí)
Entonces (Vertebrado \$A)

R2: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A no)
Entonces (Invertebrado \$A)

R3: Si (Vertebrado \$A) (Ladra \$A)
Entonces (Perro \$A)

Base de Hechos

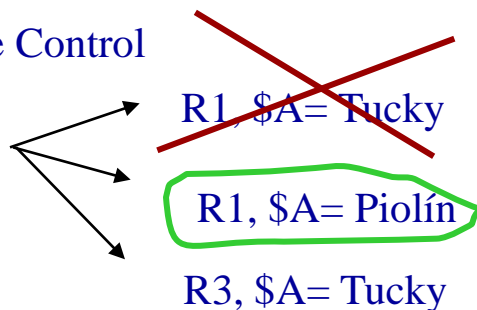
(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)
(Vertebrado Tucky)



(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)
(Vertebrado Tucky)
(Vertebrado Piolín)

Estrategia de Control

Ciclo 2:



Ejemplo de Sistemas de Producción

Base de Reglas

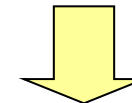
R1: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A sí)
Entonces (Vertebrado \$A)

R2: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A no)
Entonces (Invertebrado \$A)

R3: Si (Vertebrado \$A) (Ladra \$A)
Entonces (Perro \$A)

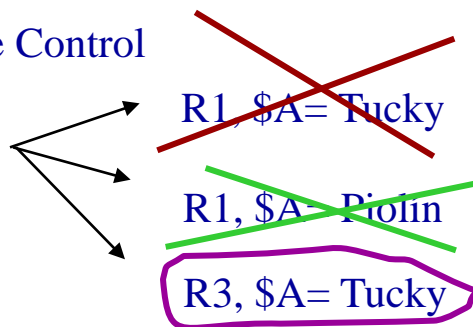
Base de Hechos

(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)
(Vertebrado Tucky)
(Vertebrado Piolín)



Estrategia de Control

Ciclo 3:



(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)
(Vertebrado Tucky)
(Vertebrado Piolín)
(Perro Tucky)

Índice

1. **Arquitectura de los Sistemas de Producción**
2. **Base de Hechos**
3. **Base de Reglas**
4. **Estrategia de Control**
 - 4.1. **Ciclo de Funcionamiento**
 - 4.2. **Encadenamientos**

Base de Hechos (BH)

(Animal Tucky)
(Animal Piolín)
(Esqueleto Piolín sí)
(Esqueleto Tucky sí)
(ladra Tucky)

Representa el **estado** actual de la tarea o problema

- ☐ Base de Hechos Inicial: situación inicial
- ☐ Base de Hechos Final: situación objeto (puede haber más de uno)
- ☐ Base de Hechos Intermedias: situación actual o en curso de resolución

Parte de la BH es permanente, otra es temporal (pertenece a la solución del problema en curso).

Sintaxis:

- ☐ Cada elemento de la BH debe ir encerrado entre paréntesis
- ☐ Sólo hay constantes en la BH

(Casilla 3 3 Roja) : En la casilla (3 3) hay una ficha de color rojo

(Fiebre Pepe 37,5): La fiebre de Pepe es de 37,5

Contiene **conocimiento declarativo**.

La ejecución de reglas modifica la BH al añadir o borrar hechos en ella.

Ejemplos de Base de Hechos

Identificar la base de hechos inicial, intermedia y final en:

1. Juego del ajedrez
2. Juego de las cuatro en raya

Índice

1. **Arquitectura de los Sistemas de Producción**
2. **Base de Hechos**
3. **Base de Reglas**
4. **Estrategia de Control**
 - 4.1. **Ciclo de Funcionamiento**
 - 4.2. **Encadenamientos**

Base de Reglas

Representa conocimientos sobre la **solución del problema**

Si Condiciones Entonces Acciones

Antecedente

Consecuente

Ejemplos:

- El coste del envío se incrementa en 1€ si se recibe en el mismo día
- Si la edad del paciente es inferior a 10 años, tiene manchas rojas y fiebre, entonces tiene varicela.
- Si el coche no arranca, lo primero a revisar es la batería
- Si el dólar baja, entonces hay que comprar dólares
-

Sintaxis de la Base de Reglas

**R1: Si (Animal \$A) ^ (Esqueleto \$A sí)
Entonces (Vertebrado \$A)**

- **Antecedente:**

- Cada **elemento de condición** debe ir encerrado entre paréntesis.
- Los elementos de condición están formados por **átomos**
- Un átomo puede ser una **constante** o una **variable** (precedido del símbolo “\$”)

(Esqueleto \$A sí)

- Los elementos de condición del antecedentes van unidos por el símbolo **AND** “^”
- **Negación:** Un elemento de condición puede estar negado “¬”

- **Consecuente:**

- Las variables utilizados en el consecuente, son reemplazados por los valores que tengan en el antecedente
- Predicados del consecuente: **Añadir y Borrar**
- Las acciones del consecuente van unidos por el símbolo “and”

Ejemplos de Reglas

**Si la edad del paciente es inferior a 10 años, tiene manchas rojas y fiebre,
entonces tiene varicela**

Elemento de Condición

**Si (Paciente \$p \$edad) and
(\$edad <10) and
(Síntomas \$p fiebre) and
(Síntomas \$p manchas-rojas)**

Entonces (Enfermedad \$p varicela)

Constantes: Paciente, 10, Síntomas, Fiebre, Manchas-rojas, enfermedad, varicela

Variables: \$p, \$Edad

Ejemplos de Reglas

“El coste del envío se incrementa en 1€ si se recibe en el mismo día”

Si (envío \$e \$origen \$destino) ^ (dia-entrega \$e hoy) ^ (coste \$e \$coste)

Entonces Borrar (coste \$e \$coste)

Añadir (coste \$e \$coste + 1)

Constantes: envío, dia-entrega, coste, hoy

Variable: \$e, \$coste, \$origen, \$destino

No son REGLAS

Problema 1: Una regla no es una estructura “If ... Then ... Else”

Ri: Si Condición-1 \wedge Condición-2 \wedge Condición-3 \wedge ...

Entonces acciones-1

En caso contrario acciones -2



Solución: Crear dos reglas, una para cada bloque de acciones

- Identificar las condiciones que no se cumplen para la ejecución de las “acciones-2”
- Identificar condiciones adicionales en alguno de los bloques de acciones

No son REGLAS

Problema 2: No pueden aparecer OR en el consecuente de la regla

Ri: Si Condición-1 \wedge Condición-2 \wedge Condición-3 \wedge ...

Entonces acciones-1 \vee acciones-2

Solución:

- **Crear dos reglas, una para cada bloque de acciones.**
- **Establecer prioridades entre las reglas**
- **Identificar condiciones adicionales**



Ri: Si Condición-1 \wedge Condición-2 \wedge Condición-3 \wedge ...

Entonces acciones-1

Rj: Si Condición-1 \wedge Condición-2 \wedge Condición-3 \wedge condiciones adicionales

Entonces acciones-2

Ri más prioritaria que Rj

No son REGLAS

Problema 3: No deben aparecer OR en el antecedente de la regla

Ri: Si Condición-1 \vee Condición-2

Entonces Acciones

Soluciones:

- **Crear dos reglas, una para cada bloque de condiciones**
- **Establecer prioridades entre las reglas**
- **Intentar averiguar si faltan condiciones en alguna de las reglas**
- **Comprobar que las acciones son realmente las mismas**



Ri: Si Condición-1 Entonces acciones

Rj: Si Condición-2 Entonces acciones

- **Ri más prioritaria que Rj**
- **A la regla Rj se le añade la condición-3**
- **.....**

No son REGLAS

Problema 4: En el consecuente de la regla no hay elementos de decisión

Ri Si Condiciones-1 \wedge Condición-2 \wedge Condición-3 \wedge ...

Entonces acciones-1

Si condiciones-4 \wedge ...

Entonces acciones-2



Solución:

- Nunca se deben introducir elementos de decisión en el consecuente de la regla
- Introducir señalizadores que provoquen la ejecución prioritaria de reglas con tales elementos
- No olvidar borrar los señalizadores

Ri: Si Condiciones-1 \wedge Condición-2 \wedge Condición-3 \wedge ...

Entonces acciones-1

Añadir (S)

Rj: Si S \wedge condiciones-4 \wedge

Entonces acciones-2

Borrar (S)

**Rj no se puede ejecutar
si no se ha ejecutado antes Ri**

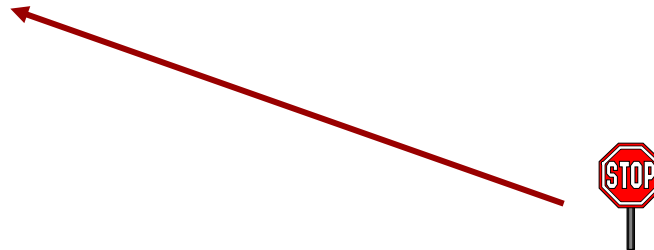
Las reglas con señalizadores, las mas prioritarias

No son REGLAS

Problema 5: Desde una regla nunca se puede lanzar otra regla

Ri: Si Condición-1 \wedge Condición-2

Entonces Rj



Solución:

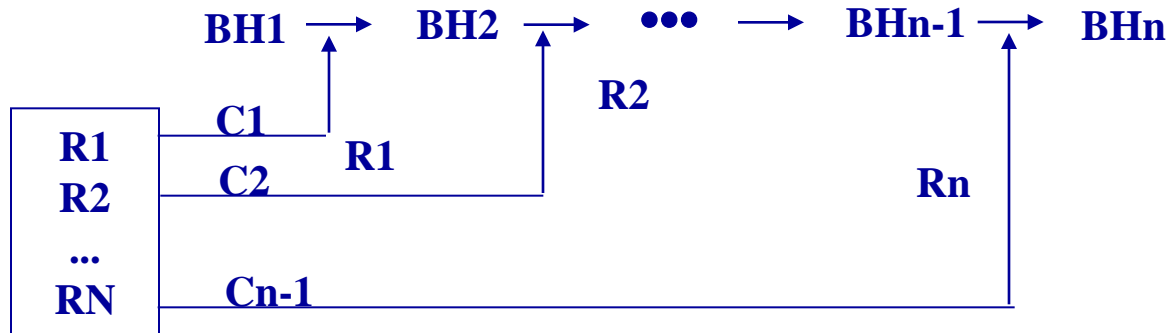
- **Introducir señalizadores que provoquen la ejecución de la regla Rj**
- **No olvidar borrar los señalizadores al ejecutar la regla Rj**

Índice

1. **Arquitectura de los Sistemas de Producción**
2. **Base de Hechos**
3. **Base de Reglas**
4. **Estrategia de Control**
 - 4.1. Ciclo de Funcionamiento**
 - 4.2. Encadenamientos**

Estrategia de Control

Examina en cada ciclo de funcionamiento la BH y decide qué regla ejecutar



Características:

Causar movimiento

Ser sistemática

Ser eficiente

Estrategia de Control: Fases

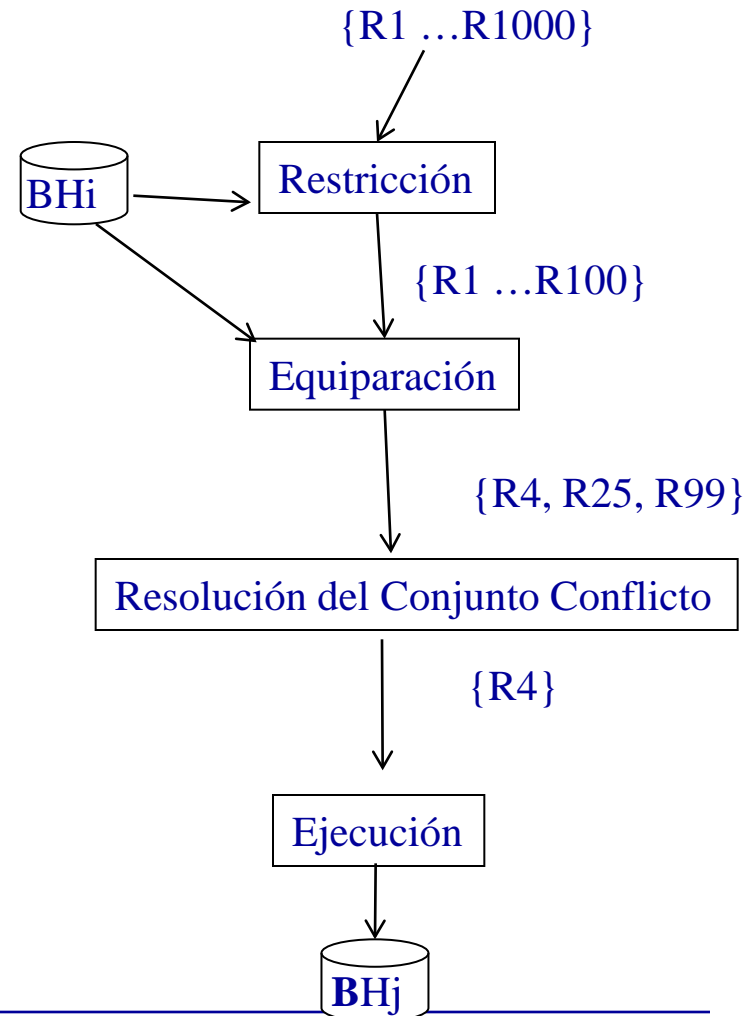
1. Selección

1.1. Restricción

1.2. Equiparación:

1.3. Resolución del Conjunto Conflicto

2. Acción o ejecución



Equiparación

**Permite elegir aquellas reglas que conducen a la solución del problema,
al comparar cada una de las **condiciones** de las reglas
con el estado actual de la **Memoria de trabajo****

El resultado de la equiparación es el **conjunto conflicto, formado por
el conjunto de posibles reglas instanciadas que se pueden ejecutar.**

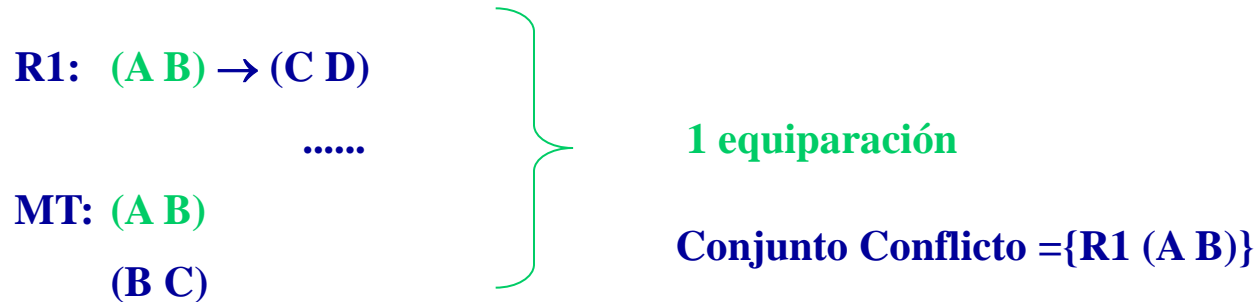
- **Equiparación de constantes**
- **Equiparación de Variables**

Equiparación de Constantes

Las constantes son cualquier secuencia de caracteres no precedidos del símbolo \$

Una constante se equipara con otra constante igual a ella

que ocupe la misma posición en un elemento de la M.T.



La ejecución de la regla introduce en la MT a (C D)

Equiparación de Variables (I)

Una variable que aparece una sola vez en una regla se equipara con cualquier valor que ocupe la misma posición en un elemento de la M.T.

R1: Si (A \$x (B) Entonces

MT: (A C B) (A 3 B) (A D C)

2 Equiparaciones de la misma regla



$\$x = C \leftrightarrow \text{eq. 1}$

$\$x = 3 \leftrightarrow \text{eq. 2}$

$\$x = D$ no es posible porque B es distinto de C

Conjunto Conflicto = {R1 (A C B) R1 (A 3 B)}

Equiparación de variables (II)

**Una variable que aparece dos o más veces en una regla
debe equipararse en todas las ocurrencias con el mismo valor.**

R1: (animal \$x) \wedge (piel pelo \$x) \rightarrow (especie mamífero \$x)

MT: (animal Tucky)

(Piel Pelo Dolly)

(Piel Pelo Tucky)

(animal Dolly)

(animal Dumbo)

Eq1: \$x = Tuky : (animal Tuky) (Piel Pelo Tuky)

Eq2: \$x = Dolly : (animal Dolly) (Piel Pelo Dolly)

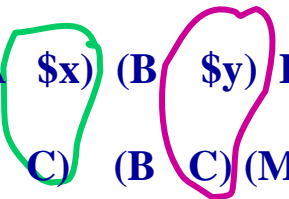
Eq3: \$x = Dumbo: no se equipara por no tener (Piel Pelo Dumbo) en MT

Conjunto Conflicto = {R1 (Animal Tucky) R1 (Animal Dolly)}

Equiparación de variables (III)

Se pueden equiparar variables distintas con el mismo valor

R1: Si (A \$x) (B \$y) Entonces
MT: (A C) (B C) (M V)



Eq1: \$x : C

\$y : C

Conjunto Conflicto = {R1 ((A C) (B C)) }

Equiparación de variables (IV)

Se pueden realizar comprobaciones adicionales sobre las variables

Ri: Si (Casilla \$i \$j) (\$i < 4) (\$j > 0)...

Rj: Si (Casilla \$i \$j \$color) (\$color ≠ Rojo) (\$i ≠ \$j) ...

Equiparación de variables (V)

Las reglas pueden tener elementos de condición negados (precedidos del símbolo ~)

La regla se equipara si:

- a) Existen elementos de la MT que satisfacen todos los elementos de condición no negados**
- b) No existen elementos de la MT que hacen cierto el elemento de condición negado**

Hipótesis del Mundo Cerrado: Todo lo que no está en la MT es falso

R_i: (A \$x) ~ (B \$x) → ...

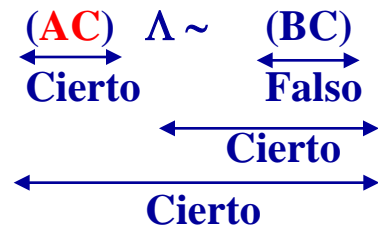
MT: (AC) (BD) (AB) (AA) (BA)

R_i: (A \$x) ~ (B \$x) → ...

MT: (AC) (BD) (AB) (AA) (BA)

Eq₁: \$x = C :

Válida

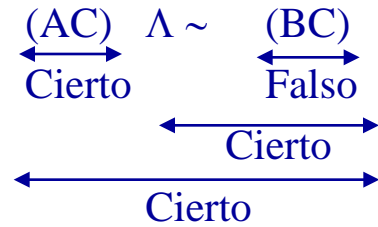


$R_i: (A \text{ \$x}) \sim (B \text{ \$x}) \rightarrow \dots$

MT: (AC) (BD) (**AB**) (AA) (BA)

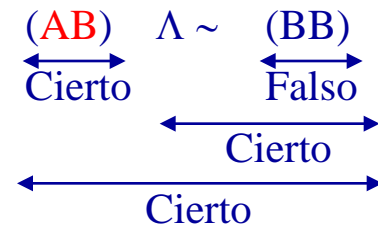
$Eq_1: \$x = C :$

Válida



$Eq_2: \$x = B$

Válida

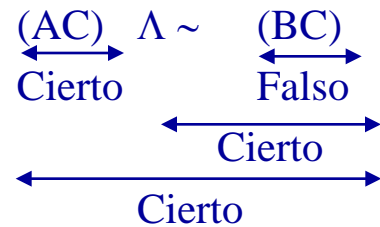


$R_i: (A \text{ \$x}) \sim (B \text{ \$x}) \rightarrow \dots$

MT: (AC) (BD) (AB) (AA) (BA)

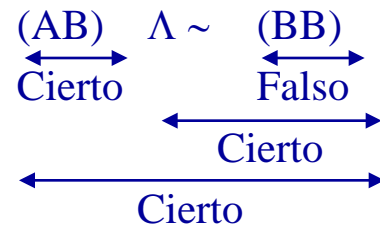
$Eq_1: \$x = C :$

Válida



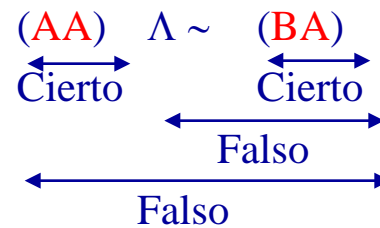
$Eq_2: \$x = B$

Válida



$Eq_3: \$x = A :$

Inválida



Instanciación de una Regla

- **Par formado por una regla y los elementos de MT que hacen cierta la regla**
- **Una regla, en un ciclo de la BC, puede tener cero, una o N instancias**

Ejemplo anterior: 2 instancias

$R_i: (A \text{ } \$x) \sim (B \text{ } \$x) \rightarrow \dots$

MT: (AC) (BD) (AB) (AA) (BA)

$Eq_1: \$x = C :$

$Eq_2: \$x = B$

Conjunto Conflicto = { R_i (AC) R_i , (AB) }

Estrategia de Control: Fases

1. Selección

1.1. Restricción

1.2. Equiparación:

1.3. Resolución del Conjunto Conflicto

2. Acción o ejecución

Conjunto Conflicto (CC): conjunto de instanciaciones de posibles reglas ejecutable

Resolución del Conjunto Conflicto

Selección de la regla que va a ser ejecutada en la fase de ejecución

Estrategias de selección:

1. Explícito un **orden lineal** en la BR
2. La regla de mayor **prioridad**
3. La regla más **específica**: con elementos de condición restrictivos
4. **Edad del elemento en la MT**: La regla con elementos de la BH más recientemente añadidos
5. Utilizar el **principio de refracción**: no pueden ejecutar instanciaciones de reglas ya ejecutadas.
6. **Arbitrariedad**

Combinación de estrategias

Estrategias

Explícito un orden lineal: Se selecciona la primera regla que equipara

Seleccionar la regla de prioridad más alta:

- La prioridad se establece en función del problema que se modeliza
- La prioridad la da el experto del dominio

Seleccionar la regla más específica

Si las instanciaciones de las reglas tienen elementos de condición iguales
se selecciona la regla que tenga **más elementos** de condición

Ri: Si (Paciente \$x) ^ (Fiebre \$x) Entonces (Enfermo \$x)

Rj: Si (Paciente \$x) ^ (Fiebre \$x) ^ (Manchas Rojas \$x) Entonces (Varicela \$x)

En este caso, **Rj**

Ri: Si (Paciente \$x) ^ (Fiebre \$x) Entonces (Enfermo \$x)

Rj: Si (Envio \$e) (frágil \$e) Entonces (Desplazar \$e cuidadosamente)

En este caso, **ninguna regla es más específica que la otra**

Seleccionar la regla más general

Si las instanciaciones de las reglas tienen elementos de condición iguales
se selecciona la regla que tenga **menos elementos** de condición

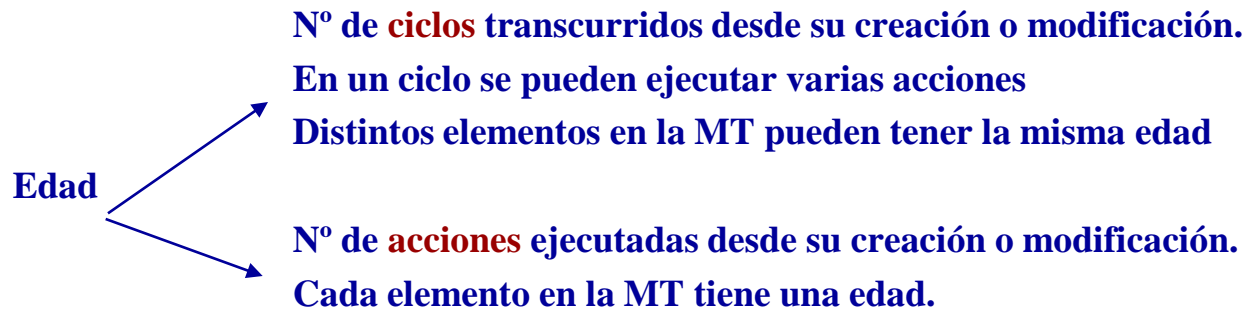
Ri: Si (Paciente \$x) ^ (Fiebre \$x) Entonces (Enfermo \$x)

Rj: Si (Paciente \$x) ^ (Fiebre \$x) ^ (Manchas Rojas \$x) Entonces (Varicela \$x)

En este caso, **Ri**

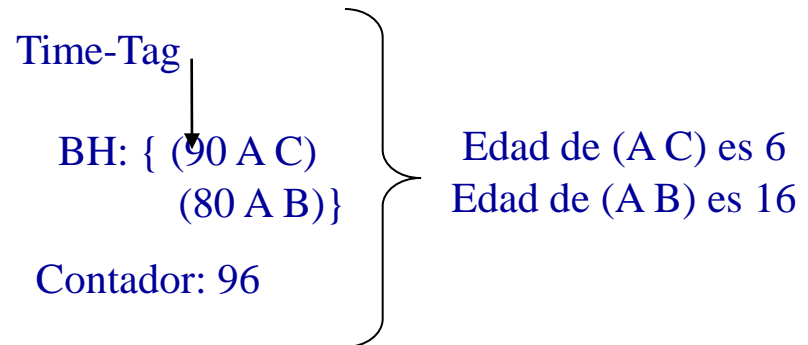
Edad del elemento en la MT

Cada elemento de la MT tiene asociado un **Time-Tag** (señal temporal) de cuándo se creó.



El **contador** (por **ciclos/acciones**) se va incrementando en una unidad al ejecutar los ciclos/acciones

$$\text{Antigüedad} = \text{Contador} - \text{TimeTag}$$



Edad del elemento en la MT

- Si el consecuente de una regla **modifica** un hecho, el Time-tag se actualiza al valor del contador
- Si el consecuente de una regla **crea** un hecho, el Time-tag es el del contador

Ejemplo: Seleccionar la instanciación con elementos añadidos más recientemente

R1: Si (A \$x) (\$x C) Entonces

R2: Si (BC) (\$X B) (CD) Entonces

MT: (98 (BC)) (92 (AB)) (94 (CD))

Contador: 100

CC = {(R1 (92 (AB)) (98 (BC)))

(R2(98 (BC)) (92 (AB)) (94 (CD)))}

Regla a ejecutar R2 por ser la regla que tiene el siguiente elemento más joven.

Principio de Refracción

Seleccionar una regla cuya **instanciación no haya ocurrido previamente.**

Dos instanciaciones son distintas si se dan alguna de las tres situaciones:

- **Proceden de distintas reglas, aunque coincidan sus elementos**
- **Las listas de elementos de la memoria de trabajo que contienen son distintas**
- **Si una instanciación A estaba en el CC en un instante T_a y una instanciación B estaba en el CC en un instante T_b , existe un instante T_c entre T_a y T_b tal que A y B no estaban en el CC o no estaban a la vez.**

Principio de Refracción

Seleccionar una regla cuya **instanciación** no haya ocurrido previamente.

Ejemplo:

Base de Reglas:	Base de Hechos	Estrategia de Control
R1: (A) → (B)	(1 (A))	Prioridad (1 .. 5) + PR
R2: (B) - (C) - (D) → (C)		
R3: (E) → (D)		
R4: (D) → FIN		
R5: (A) (C) → (E) quitar (C)		

CICLO	BH	CC	Ejecutar
1	(1 (A))	<u>(R1 (1 (A)))</u>	R1
2	(1(A)) (2 (B))	<u>(R1 (1 (A))) (R2 (2 (B)))</u>	R2
3	(1 (A)) (2 (B)) (3 (C))	<u>(R1 (1 (A))) (R5 (1 (A)) (3 (C)))</u>	R5
4	(1 (A)) (2 (B)) (4 (E))	<u>(R1 (1(A))) (R2 (2 (B))) (R3 (4 (E)))</u>	R2
5	(1 (A)) (2 (B)) (4 (E)) (5 (C))	<u>(R1 (1 (A))) (R3 (4 (E))) (R5 (1 (A)) (5 (C)))</u>	R3
6	(1 (A)) (2 (B)) (4 (E)) (5 (C)) (6(D))	<u>(R1 (1 (A))) (R3 (4 (E))) (R4 (6(D))) (R5 (1 (A)) (5 (C)))</u>	R4

Estrategia de Control: Fase de Acción

La ejecución de la regla modifica la BH actual en una BH nueva al AÑADIR Y BORRAR elementos de la primera.

La BH nueva se tomará como punto de partida en el siguiente ciclo de funcionamiento

Clasificación de los SP

Sistemas dirigidos por el antecedente (hacia delante):

Si el antecedente es verdad, el consecuente se procesa y se actúa sobre la MT

EC: encadenamiento hacia delante

Sistemas dirigidos por el consecuente (hacia atrás):

Demostrar un determinado consecuente probando recursivamente sus antecedentes

a) Un antecedente es cierto si está en la BH del sistema

b) Si el antecede no está en la BH, se busca si es consecuente de alguna regla y se prueban recursivamente los antecedentes de dicha regla

c) Si no se dan las situaciones a) y b), entonces se supone la hipótesis del mundo cerrado.

Problemas al añadir y borrar

Base de Reglas

R1: Si (envío \$e \$origen \$destino) ^ (dia-entrega \$e hoy) ^ (coste \$e \$coste)
Entonces Añadir (coste \$e \$coste + 1000)

Base de Hechos

(envío E-1 Madrid Barcelona)
(dia-entrega E-1 hoy)
(coste E-1 700)

Equiparación

(envío E-1 Madrid Barcelona)
(dia-entrega E-1 hoy)
(coste E-1 700)
(coste E-1 1700)

Estrategia de Control

Ciclo 1:

→ {
\$e = E1
\$origen = Madrid
\$destino = Barcelona
\$coste = 700



Error: El coste del envío es único
Solución: modificar la regla

Ejemplo

Base de Reglas

R1: Si (envío \$e \$origen \$destino) ^ (dia-entrega \$e hoy) ^ (coste \$e \$coste)
Entonces Añadir (coste \$e \$coste + 1000)

Borrar (coste \$e \$coste)

Base de Hechos

(envío E-1 Madrid Barcelona)
(dia-entrega E-1 hoy)
(coste E-1 700)

Estrategia de Control

Ciclo 1: →

$\left\{ \begin{array}{l} \$e = E1 \\ \$origen = Madrid \\ \$destino = Barcelona \\ \$coste = 700 \end{array} \right.$



**Error: El principio de Refracción,
no impide que se vuelve a ejecutar la regla**

Ejemplo

Base de Reglas

R1: Si (envío \$e \$origen \$destino) ^ (dia-entrega \$e hoy) ^ (coste \$e \$coste)
Entonces Añadir (coste \$e \$coste + 1000)

Borrar (dia-entrega \$e hoy)

Borrar (coste \$e \$coste)

Base de Hechos

(envío E-1 Madrid Barcelona)
(dia-entrega E-1 hoy)
(coste E-1 700)

Estrategia de Control

Ciclo 1: →

$\left\{ \begin{array}{l} \$e = E1 \\ \$origen = Madrid \\ \$destino = Barcelona \\ \$coste = 700 \end{array} \right.$

(envío E-1 Madrid Barcelona)
 (dia-entrega E-1 hoy)
~~(coste E-1 700)~~
 (coste E-1 1700)